



Evaluation intégrée et modélisation du Changement Climatique

Pierre Matarasso

► To cite this version:

Pierre Matarasso. Evaluation intégrée et modélisation du Changement Climatique: Comment le Changement Climatique a transformé la conception que nous nous faisons des problèmes de décision. Annales des Ponts et Chaussées, 2003, 107-108, pp.71-79. halshs-00007215

HAL Id: halshs-00007215

<https://shs.hal.science/halshs-00007215>

Submitted on 14 Dec 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Evaluation intégrée et modélisation :
Comment le changement climatique a transformé la conception que nous nous
faisons des problèmes de décision
Pierre Matarasso-CIRED (09/04/2003)

1-Evaluation, décision et modélisation dans le champ du Changement Climatique

1.1-La nécessité d'une « évaluation intégrée » qui relie les différents chapitres de l'expertise relative au Changement Climatique

Pour l'essentiel l'idée de la « modélisation intégrée du Changement Climatique » consiste à réaliser des modèles qui couplent la description des activités humaines déterminant les émissions de gaz à effet de serre avec des modèles climatiques dont l'évolution est dépendante de ces émissions. On rend compte, en retour, des impacts du climat modifié sur l'économie sous forme de dommages ou bénéfiques et de son influence sur les grands ensembles bio-écologiques qui participent au cycle du carbone. Le propos central de la modélisation intégrée est donc de traiter, dans un même cadre, des actions humaines (les émissions et leurs réductions possibles) et des conséquences de ces actions (les effets du changement climatique sur l'économie et la biosphère). On cherche ainsi à définir le niveau et la nature des actions souhaitables pour se prémunir du Changement Climatique. L'ensemble de cette activité est adossé à l'expertise qui s'est mise en place depuis 1988 dans le cadre de l'IPCC (International Panel on Climate Change). L'évaluation intégrée et la modélisation intégrée constituent les principales méthodes pour organiser et rendre accessible une expertise qu'il serait autrement difficile de synthétiser à des fins de décisions.

Le dispositif d'expertise de l'IPCC se traduit par l'édition, à intervalles réguliers (tous les cinq ans environ), d'un rapport d'évaluation dont la troisième édition a paru 2001 (Third Assessment Report, TAR). Cette dernière livraison comporte trois volumes de près de 800 pages chacun, consacrés respectivement :

- 1-Aux phénomènes géophysiques déterminant l'évolution du climat en fonction de l'augmentation des gaz à effet de serre atmosphériques liée aux activités humaines ;
- 2-Aux impacts économiques positifs ou négatifs ainsi qu'aux évolutions bio-écologiques qui vont résulter de cette transformation du climat terrestre ;
- 3-Aux possibilités de réduction des émissions compte tenu des technologies disponibles, de leurs coûts respectifs et des conséquences économiques liées à une profonde modification des systèmes énergétiques.

Grâce à l'IPCC d'une part et au processus des « Négociations Climat » d'autre part, qui ont aboutie au Protocole de Kyoto, l'idée de la nécessité d'une action pour limiter le Changement Climatique ou s'y adapter s'impose de plus en plus. Toutefois la nature et l'ampleur souhaitables des actions de limitations des émissions comme des mesures d'adaptation restent âprement controversées. Pour éclairer cette controverse, les termes mêmes de l'expertise proposée par l'IPCC font apparaître la nécessité d'une « évaluation intégrée » dont les « modèles intégrés » constituent la partie formelle.

1.2-Le Changement climatique dépend de nos actions et ce sont-elles qu'il nous faut définir

En pratique le cours des événements dans le prochain siècle dépendra de l'agencement de phénomènes qui sont détaillés et décryptés dans les trois volumes du rapport IPCC. Le

problème est de savoir comment et à quel rythme tous ces phénomènes vont s'interpénétrer et s'influencer mutuellement de manière dynamique :

- L'état des milieux géophysiques (climat, régimes des courants marins...) dépendra des décisions économiques et de l'évolution technique relatives aux systèmes énergétiques par les biais des concentrations de gaz à effet de serre émises par les activités humaines ;
- Les processus économiques dépendront en retour à la fois de l'évolution climatique (par exemple dans l'agriculture) et de l'ampleur et du coût des mesures de prévention (réduction des émissions, adaptation où réparations des dommages) ;
- Les grands écosystèmes terrestres et la biodiversité seront influencés et influenceront le climat ; de la nature des couverts végétaux et de la biologie marine dépendra la séquestration¹ ou la libération de CO₂ et de méthane par les écosystèmes.

Au total il est indispensable de connecter les connaissances qui résultent des différents champs de l'expertise précédente (géophysique, bio-écologie, économie...) pour en déduire une vision dynamique du phénomène du Changement Climatique. Il faut donc définir des méthodologies ayant pour fonction d'une part de **capitaliser** des connaissances qui avancent sans cesse et d'autre part **d'intégrer** ces connaissances dans une vision dynamique des phénomènes. Plus précisément, l'évaluation intégrée réclame des modèles qui rendent possible la conjonction des hypothèses (climatologiques, économiques, écologiques...) dans une optique où les différents déterminants des phénomènes sont couplés dynamiquement pour aborder l'évolution temporelle des systèmes climatiques et économiques dans leurs interactions. (Rotmans J. 1998).

1.3-Au centre de l'évaluation intégrée et des modèles qu'elle implique, la décision en situation d'incertitude

Cette évaluation intégrée est fortement structurée par le fait que ce que l'on en attend n'est pas la connaissance d'un phénomène extérieur sur lequel nous ne pouvons agir (comme une prévision météorologique de long terme à laquelle nous devrions nous adapter). Au contraire ce qui est poursuivi c'est une forme nouvelle de prospective destinée à définir les paramètres de nos actions futures, lesquelles sont déterminantes pour l'évolution du climat. Par exemple si le danger du Changement Climatique est considéré comme réel, alors surgissent les questions suivantes :

- Pouvons nous l'éviter en changeant nos manières de produire et de consommer ?
- Quand devons nous agir et quand pouvons nous agir ?
- Devons nous agir tout de suite ou pouvons nous attendre de disposer de meilleures technologies, par exemple dans trente ans ?
- Faut-il agir si l'on compare les coûts économiques de l'action et un bilan des impacts à long terme (dommages et bénéfices du changement climatique) ?
- Comment les différentes régions du monde, les différentes nations vont-elles pouvoir se répartir les coûts de ces actions, comment vont-elles supporter les conséquences du changement et les charges relatives à l'adaptation et aux dommages ?
- Comment les diverses générations seront-elles affectées par ces coûts (de réduction des émissions, d'indemnisation des dommages...)?
- Ne vaut-il pas mieux préparer une adaptation au changement climatique que de chercher à l'éviter par une modification profonde de nos modes de développement qui risquerait de nous appauvrir?

¹ Le terme de « séquestration » recouvre plusieurs processus, la fixation de CO₂ par les végétaux dans le cadre de la photosynthèse d'une part, la captation physique du CO₂ après combustion de combustibles fossiles et son stockage ultérieur par injection dans des structures géophysiques, la possibilité d'utiliser des processus physico-chimiques artificiels pour capter le CO₂ atmosphérique.

Toutes ces questions soulignent que les perspectives relatives au Changement Climatique sont comprises entre une forme de « fatalisme » (on ne peut pas changer les modes de développement, il est donc raisonnable que nous nous adaptions au fur et à mesure de changements qu'il nous est impossible de connaître par avance) et une forme de « volontarisme » (il nous faut agir rapidement tant pour limiter les émissions que pour concevoir les mesures d'adaptation conformément au principe de précaution). C'est en fonction de cette répartition des opinions que les méthodes d'évaluation intégrée et les modèles réalisés se sont structurées. La discussion au sujet des décisions à prendre présuppose l'examen méthodique et quantitatif de multiples « sentiers » d'évolution du système « économie-climat-biosphère », sentiers qui chacun, comprennent pour toutes les régions du monde :

- des séquences de mesures de réductions des émissions,
- des séquences de mesures d'adaptation,
- des séquences d'impacts positifs ou négatifs.

C'est l'articulation **dans le temps et dans l'espace** de ces mesures et impacts (ou si l'on préfère la répartition des efforts et des impacts entre les générations et entre les nations) qui est en jeu dans toute réponse au phénomène du Changement Climatique.

Comme nous allons l'illustrer, l'évaluation intégrée a confirmé une évolution très importante de la modélisation économique relative aux problèmes environnementaux. Cette évolution peut-être caractérisée comme **la transition de modèles « d'évaluation d'une politique » vers des modèles de « recherche d'une politique optimale »**. Sur le plan méthodologique cette évolution est très importante. Elle implique un passage de modèles économiques réalisés autour de l'idée d'une extrapolation tendancielle du passé vers des modèles possédant des capacités beaucoup plus étendues d'exploration des alternatives (autant structurelles que temporelles) et beaucoup plus ouverts sur l'avenir.

Sur un plan parallèle notre conception de la décision s'est aussi radicalement déplacée ces dernières années, d'un cadre marqué par la « **prévision** », la « **planification** », la « **programmation** » à un **cadre structuré par l'incitation** (par des mesures économiques ou réglementaires). Par exemple on cherche aujourd'hui à concevoir des protocoles de taxes ou de mesures réglementaires, échelonnées dans le temps, destinées à inciter les agents économiques à converger dans leurs choix vers des technologies sans carbone. Ce qui est recherché c'est la conduite d'actions conduisant à des réponses « optimales » au changement climatique (impliquant à la fois des réductions d'émissions, des adaptations et un certain degré d'acceptation de dommages). Le terme de réponse optimale signifiant la minimisation des coûts sociaux à supporter pour se prémunir contre les effets du Changement climatique.

Enfin le cadre du Changement Climatique a **considérablement enrichi les problématiques de la décision sous incertitude**.

2-Les méthodes de modélisations associées à l'évaluation intégrée

2.1-Historique et structures des modèles intégrés au travers de trois exemples : le modèle du Club de Rome, les modèles Dice et Image

2.1.1-Le modèle du Club de Rome

Au début des années 1970, W. Forrester et D. Meadows réalisaient un travail de prospective planétaire de long terme fondé sur les travaux de Forrester relatifs à la modélisation dynamique (Forrester J.W. 1971, Meadows & al. 1972). Ce travail, soutenu par le Club de Rome, fut très bien accueilli par la presse et les médias et fut en revanche très sévèrement

critiqué par les milieux académiques et en particulier par les économistes de l'environnement. L'un des articles les plus critiques émanait de W. Nordhaus (Nordhaus W.D. 1973) . L'objet de cette prospective n'était pourtant pas très éloigné des problématiques actuelles des modèles intégrés, mais cette tentative pionnière péchait par de nombreuses déficiences méthodologiques. Dans son principe elle reposait sur la construction d'un système dynamique construit selon les principes définis par Forrester dans le cadre des méthodes de modélisation « Dynamo » puis « Stella ». Ces méthodes consistent pour l'essentiel à s'appuyer sur l'écriture d'un système dynamique en se ramenant à un ensemble d'équations différentielles du premier ordre ; en d'autres termes tout est traité en termes de « stocks » et de « flux ».

Le modèle du Club de Rome aboutissait à des conclusions pessimistes où un effondrement des sociétés humaines pouvait résulter, à terme, de l'épuisement des gisements fossiles et de l'accumulation des pollutions. La critique des économistes allait alors se développer sur plusieurs plans :

- absence de représentation sérieuse de l'économie et de calage économétrique, non prise en compte du marché et des effets d'équilibre (par exemple substitutions induites par l'enchérissement des matières premières)
- rôle insuffisant du progrès technique et de nouvelles découvertes de gisements pouvant repousser les limites à la croissance ;
- problématique étroite de simulation dynamique ne mettant pas en évidence de possibles corrections des trajectoires par des décisions adéquates que seule une problématique de « contrôle optimal » permettrait d'aborder.

2.1.2-Le modèle DICE

L'article de Nordhaus de 1972 reprenait systématiquement toutes ces critiques. C'est à partir de ces critiques que Nordhaus se mit au travail pour présenter une alternative au modèle du Club de Rome, alternative qu'il souhaitait bien insérer les problématiques de l'économie de l'environnement et de la croissance. Il lui fallut près de vingt ans et plusieurs modélisations successives de l'économie du Changement Climatique pour aboutir au modèle DICE qui fut le premier modèle rigoureux dans le domaine de l'évaluation intégrée (Nordhaus W.D. 1994). DICE, en dépit de nombreuses critiques souvent justifiées qui lui sont adressées, constitue la meilleure manière d'aborder, sur le plan méthodologique, la question de l'évaluation intégrée. En effet il marque la naissance d'un **paradigme nouveau**² de modélisation.

Le modèle DICE est un modèle qui décrit l'économie mondiale dans son interaction avec le système climatique représenté sous une forme simplifiée. Il est dérivé d'un type de modèle classique en économie, le modèle de croissance optimale (modèle de Ramsey). DICE est un modèle en temps discret dans lequel on définit à chaque période « T » deux grands groupes d'équations :

- les équations « intra périodiques » qui relient les variables contemporaines ;
- les équations inter périodiques qui sont de classiques équations d'évolutions.

La structure du système d'équations peut être sommairement résumée de la façon suivante :

² Pour ce modèle, comme d'ailleurs pour tous ceux qui sont cités par la suite, il est vivement conseillé de se reporter aux sites Internet qui leurs sont consacrés. On pourra dans la plupart des cas télécharger ces modèles ainsi que des indications sur les procédures d'exploitation. On peut également télécharger sur le site de la Cowles Foundation les principaux articles de Nordhaus de 1970 à aujourd'hui : <http://cowles.econ.yale.edu/>

Les équations « intrapériodiques »

- Définition de la production à partir du stock de capital mondial et de la population mondiale, cette production est pondérée par une fonction qui rend compte des **dommages** dus au changement climatique lesquels dépendent de la température moyenne du globe ; elle est pondérée également des **coûts des réductions** d'émissions de gaz à effet de serre réalisées à chaque période ; enfin un terme rend compte d'un progrès technique exogène ;
- Equilibre économique, la production à chaque période est égale à la consommation mondiale plus l'investissement ;
- Définition des émissions de CO₂ à partir de la production mondiale.

Les équations interpériodiques

- Evolution du stock de capital à partir du stock de capital et de l'investissement à la période précédente en tenant compte de la dépréciation du capital ;
- Evolution du stock de CO₂ atmosphérique à partir du stock de CO₂ et des émissions à la période précédente ;
- Evolution de la température à partir du stock de CO₂ atmosphérique à l'année courante et de la température de l'année précédente (modèle de climat simplifié).

Les équations et fonctions « exogènes »

- Evolution de la population mondiale ;
- Fonction définissant les coûts des réductions d'émissions à partir de leur niveau (par calage économétrique) ;
- Evolution du progrès technique, intensité en énergie et en carbone de la production ;
- Fonction de dommages liés à la température moyenne.

Cet ensemble d'équations est « sous déterminé », c'est à dire que l'évolution du système dépend de deux variables de contrôle :

- La première variable de contrôle est classique aux modèles de croissance optimale, elle a trait au partage de la production entre la consommation et l'investissement ;
- La seconde variable de contrôle et ici la plus fondamentale est le **niveau de réduction des émissions** à chaque période

L'une des originalités introduite pas W. Nordhaus **a été de passer de la conception classique d'un modèle de simulation séquentiel (calculé dans un temps homothétique du temps réel) à un modèle de contrôle optimal**. Au lieu de devoir faire fonctionner la simulation à partir de scénarios exogènes définissant à chaque période les réductions d'émissions et la consommation mondiale, on va chercher à déterminer des valeurs optimales de ces variables par un calcul « **intertemporel** ». C'est à dire que l'on va écrire un système d'équations qui est constitué en déclinant les équations précédentes pour l'ensemble des périodes concernées depuis la période initiale jusqu'à l'horizon temporel

final. On va résoudre globalement (comme un système d'équations simultanées) ce système d'équations en ajoutant des conditions initiales et si nécessaire des contraintes finales (portant par exemple sur la température finale, sa stabilisation.....) en **optimisant une fonction d'utilité sociale** qui est une somme actualisée d'une fonction de la consommation par tête.

Grâce à cette structure, DICE s'est affranchi des défauts qui avaient été diagnostiqués sur le modèle initial du Club de Rome. DICE est un modèle économique rigoureux conforme aux modèles de croissance optimale. Il incorpore du progrès technique et enfin il ne risque pas de manquer sa cible comme cela est classique pour les modèles de simulation (c'est « l'overshoot and collapse » du modèle de Club de Rome). On peut en effet dans ce cadre inter-temporel fixer, si nécessaire, comme contraintes des conditions finales impliquant une stabilisation de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre à un certain niveau.

2.1.3 Le modèle IMAGE

Dans la suite du modèle du Club de Rome les chercheurs du RIVM aux Pays Bas ont développé le modèle IMAGE (Alcamo J. ed. 1994). Ce modèle est un modèle détaillé de simulation qui couple plusieurs modules, plus réalistes que ceux qui figurent dans le modèle DICE dont les principaux sont :

- Un modèle simplifié mais régionalisé de climat qui rentre plus avant dans les paramètres climatiques calculés : par exemple températures et précipitations locales ;
- Un modèle technologique des systèmes énergétiques mondiaux (TIMER) ;
- Des modèles permettant de tenir compte de l'usage des sols et de leurs propriétés (teneur en eau des sols, compatibilité avec les diverses cultures....), de l'évolution de l'agriculture ;
- Un module socio-économique permettant d'encadrer la simulation par des scénarios détaillés.

Ce modèle permet de rendre compte des paramètres locaux de climat, de l'absorption du CO₂ par les couverts végétaux, de dommages régionalisés, du progrès technologique....Mais cependant il conserve certains des travers du modèle initial du Club de Rome relatifs aux difficultés d'interprétation sur le plan économique et à la nécessité de guider le **modèle par des scénarios exogènes détaillés** qui conservent une part d'arbitraire (évolution de la population, de la croissance économique, de la demande d'énergie,...).

2.1.4-Comparaison de DICE et Image

Le modèle de Nordhaus est un cas emblématique d'un modèle de « recherche d'une politique optimale » alors que le modèle Image représente un modèle typique de « test d'une politique ». Il convient ici de remarquer qu'en théorie « modèles d'évaluation d'une politique » et « modèles de recherche d'une politique optimale » n'ont pas de raison de différer beaucoup sur le plan structurel. Les équations y sont pour l'essentiel les mêmes. Ce qui diffère en revanche est le **mode de résolution**. Le fonctionnement séquentiel d'un modèle de « test d'une politique » impose de fixer de manière exogène les variables de contrôle par des scénarios représentatifs de la politique à tester. En revanche, les variables de contrôle sont déterminées par la résolution « intertemporelle ». En pratique cependant les modèles intertemporels, voient leur taille limitée par les problèmes de résolution. D'autre part les modèles de simulation séquentiels peuvent inclure des sous programmes permettant de

calculer par des algorithmes spécifiques des variables environnementales qui ne pourraient être prises en compte autrement (Matarasso P. 2001)..

On peut dire que si le modèle de Nordhaus a considérablement fait progresser la réflexion sur la question de la réponse temporelle optimale au changement climatique, il a fait l'objet de critiques liées à son agrégation extrême, au choix de la fonction d'optimisation et surtout aux différentes valeurs choisies pour définir les fonctions (dommages, progrès technique, coûts des réductions, taux d'actualisation...)

De même si le modèle IMAGE a fait progresser la réflexion sur la question de la réponse locale de l'agriculture aux variations de températures et de précipitations il reste fragile du fait du considérable nombre d'hypothèses qu'il faut y intégrer pour le faire fonctionner. L'un des problèmes les plus sérieux réside dans la difficulté de définir les scénarios exogènes de manière cohérente sur le plan macro-économique. Les auteurs de ces modèles ont d'ailleurs tenu compte de ces critiques pour réaliser des variantes ou des extensions qui continuent de se perfectionner.

2.2-Le débat sur les dommages : modèles « coûts bénéfiques » et modèles « coûts efficacité »

L'une des principales critiques adressée aux deux modèles précédents est relative à la difficulté, pour ne pas dire l'impossibilité de définir les liens entre les concentrations de gaz à effet de serre et les climats locaux. Cette définition est entachée de tant d'incertitudes que le calcul des impacts du changement climatique reste une véritable gageure. Aussi aux modèles comme DICE qui est un modèle « coût-bénéfice », en ce qu'il met en balance les coûts de la réduction des émissions et les coûts ou bénéfices des impacts, on a opposé des modèles « coût-efficacité ». Dans ces derniers on s'affranchit de la question épineuse des dommages (et donc d'un couplage avec un modèle de climat) en cherchant à définir les paramètres de l'action optimaux dans le cadre d'une **cible de stabilisation des émissions** de gaz à effet de serre. En d'autres termes on cherche à calculer la séquence d'actions (par exemple les investissements annuels consacrés à la réduction des émissions) pour un niveau donné, jugé acceptable de stabilisation des gaz à effet de serre atmosphériques. Dans ce cas on travaille également dans un cadre intertemporel, mais en cherchant à minimiser une somme actualisée des coûts des investissements impliqués par la réduction des émissions.

On peut coupler cette approche avec une introduction de l'incertitude dans les modèles. Sachant en particulier que l'incertitude se réduit au fur et à mesure que le temps passe. C'est ce qui a par exemple été réalisé dans le modèle DIAM, modèle qui en outre rend compte des coûts additionnels liés à une transformation plus ou moins rapide des systèmes techniques. Cette approche a permis de montrer que des actions plus résolues que celles suggérées par DICE se justifiaient (Ha Duong & al, 1997).

2.3-Le débat sur l'agrégation : modèles « top down » et modèles « bottom up »

Pour des décideurs intéressés à la mise en œuvre de la transformation du système énergétique, les conclusions agrégées de DICE, ou les scénarios exogènes d'IMAGE ne constituent pas des réponses suffisantes. La question essentielle qui se pose à eux est de savoir dans quel ordre doivent être mises en œuvre les mesures d'aide ou de taxation destinées à promouvoir des technologies permettant des réductions d'émissions. Doit-on d'abord agir sur la demande d'énergie ou au contraire sur l'offre ? Quelles technologies aider en premier ? Pour répondre à ces questions il faut disposer d'une modélisation du système énergétique en termes techniques.

Pour résoudre cette question, des modèles d'ingénieurs dits « bottom up » sont développés depuis plus de vingt ans. Le principal d'entre eux, MARKAL, à l'origine un modèle de programmation linéaire dynamique en « analyse d'activités » du système énergétique, est utilisé aujourd'hui dans un cadre « coût-efficacité » pour déterminer des stratégies optimales « multigaz »³ de réduction des émissions. Ce modèle qui comporte une solide base technique rend compte des émissions de plusieurs gaz à effet de serre et non du seul CO₂. L'analyse d'activités consiste à représenter les différents types de capital utilisés pour la production d'énergie ainsi que leur fonctionnement. On travaille dans le cadre d'une double nomenclature (biens-activités) dans laquelle toutes les circulations physiques et tous les vecteurs énergétiques sont représentés. Le cadre dynamique permet de rendre compte du passage progressif d'un système énergétique fondé sur les énergies fossiles à un système énergétique fondé sur des productions d'énergies sans émissions (nucléaire, renouvelables, séquestration du carbone pour l'offre associée à une maîtrise de la demande d'énergie et un accroissement de l'efficacité énergétique).

Le défaut de ces modèles est leur optimisme. D'une part, ils ne rendent pas bien compte des comportements d'adoption des nouvelles technologies et d'autre part, ils sont déconnectés de l'ensemble des processus macroéconomiques. Pour compléter le tableau on s'est donc efforcé de coupler ces modèles à une représentation macro-économique agrégée et à une représentation des dommages. C'est ce qui a été fait dans le cadre d'un modèle qui en raison de sa polyvalence a joué un rôle important dans la discussion : le modèle MERGE (Manne A., Richels R. 1995))

Par ailleurs on a également développé en des modèles macro-économiques qui, tout en rendant compte du rôle de l'énergie dans l'économie de manière plus agrégée, tentent de restituer la cohérence globale des relations entre les grands secteurs économiques ou encore d'aborder des questions comme celles des liens entre les stratégies nationales de réductions, le commerce international, les taxes sur l'énergie et les permis négociables (voir par exemple le modèle GEM-E3, Capros & al 1999).

Ces modèles plus proches des modèles macro-économiques de prévision incorporent des équations qui rendent compte des grands équilibres monétaires et financiers entre les grands secteurs de l'économie (secteurs de la production, état, ménages). Ceci est indispensable pour traiter des questions relatives à la fiscalité et aux mesures économiques nécessaires à la promotion d'une économie sans carbone.

2.4-la régionalisation des modèles

La plupart des modèles précédents (DICE, IMAGE, MERGE, GEM-E3, MARKAL...) ont été peu à peu désagrégés pour rendre compte des échanges internationaux de biens et services, des flux de capitaux et surtout de la problématique des échanges de permis négociables. Plus généralement, les différents mécanismes d'incitation à la réduction des émissions doivent pouvoir être introduits dans les modèles. On doit également pouvoir analyser les effets des politiques de réduction sur la compétitivité des économies (voir en particulier le modèle RICE, séquelle de DICE).

2.5-Les problématiques émergentes

2.5.1-la question de la formalisation des dommages en situation d'incertitude et la problématique de l'adaptation

Le modèle de Nordhaus a constitué un paradigme à partir duquel la plupart des modèles compacts ou conceptuels du Changement Climatique se sont situés. Toutefois les

³ Le CO₂ n'est pas le seul gaz ayant des effets atmosphériques, il faut y ajouter le CH₄, les HFC, etc.

conclusions en termes de politiques publiques de Nordhaus sont vivement contestées. Il apparaît en particulier que le choix de la plupart des paramètres choisis par Nordhaus tendent à suggérer une réponse modeste et relativement tardive au Changement Climatique. Une partie de cette conclusion provient de la manière dont sont traités les dommages dans le modèle.

En effet traiter des dommages suppose de définir une réponse en température (plus généralement des configurations climatiques locales) aux augmentations des concentrations de gaz à effet de serre et des autres gaz ou émissions (par exemple les particules) possédant des effets atmosphériques. Plus cette réponse est forte et rapide et plus les dommages risquent d'être importants. Par ailleurs si l'on travaille de manière agrégée, une fonction de dommages possède un horizon temporel, une amplitude et une dynamique plus ou moins rapide. Des travaux récents (Ambrosi & al, 2003) suggèrent que des réductions d'émissions plus ambitieuses résultent de nouvelles hypothèses concernant ces fonctions et d'une problématique dans laquelle on introduit de l'incertitude avec une arrivée progressive d'informations qui réduit cette incertitude au cours du temps.

Par ailleurs il apparaît, mais ceci constitue un travail pour le futur qu'il n'est pas suffisant de définir des « dommages », en effet ceux-ci peuvent être largement allégés par des investissements d'adaptation. La question est difficile à résoudre dans le cas des modèles agrégés car on ne dispose d'aucun précédent capable de permettre le calage des modifications des fonctions de dommages à partir d'investissements d'adaptation. Une piste serait d'introduire de telles adaptations dans des modèles « bottom up » en analyse d'activités comme on introduit de nouvelles technologies énergétiques.

2.5.2-Problématique des coûts macroéconomiques

L'ensemble des méthodes qu'elles soient de l'ordre du « coût-bénéfice » ou du « coût-efficacité » font intervenir des notions de coûts (pour les réductions comme pour les impacts ou dommages). Or rien n'est moins évident que cette notion (J.C. Hourcade, P. Quirion, 2003). On sait que des pertes de compétitivité peuvent résulter de politiques publiques imposant des réductions d'émissions. Mais ce n'est là qu'un aspect de la question. En effet si l'on est capable de manière approximative de cerner les coûts directs relatifs aux investissements liés à la réduction des émissions, il n'en va pas de même des coûts indirects (les coûts macro-économiques induits).

On peut ici donner deux exemples simples liés à la réduction de la demande d'énergie dans deux secteurs cruciaux pour les émissions de gaz à effet de serre : le bâtiment et les transports. Une réduction notable de la part des transports de personnes dévolus aux véhicules individuels se traduirait par une baisse de la demande en automobiles neuves et par une baisse des demandes de services liés à l'automobile (garages, stations services...). Ces baisses de demandes se propageraient à coup sûr dans toute l'économie et toucheraient tous les sous traitants (production de matériaux et sous traitants,....), avec des effets de perte d'activités et d'emplois non négligeables. Une problématique de réhabilitation des bâtiments aurait au contraire des effets dans l'autre sens, à savoir une augmentation des activités liées à la construction et réhabilitation des bâtiments avec des créations d'emplois. Une même observation peut-être faite au sujet des dommages dont les effets induits dans l'économie seront importants. Au total il apparaît donc que la problématique des coûts, impose une montée en détails à terme des modélisations.

3-Modèles, controverses et décisions

Ceux qui ont connu le paysage du débat autour du Changement Climatique avant et après l'émergence de la modélisation intégrée peuvent mesurer le chemin parcouru. Une constatation paraît s'imposer : aucune décision quantitative concernant l'action n'a semblé t'il véritablement été prise au regard des résultats des modèles, à l'exception peut-être de

l'influence que Nordhaus aurait pu avoir sur l'administration des Etats Unis lors de son retrait du protocole de Kyoto. Toutefois, en revanche, la problématique des modèles intégrés a **constamment imprégné et structuré les discussions et les argumentations autant dans les cercles de la négociation que dans les milieux scientifiques**. En d'autres termes les modèles ont joué le rôle de « langage de négociation », de « structures argumentatives », « d'arguments mis en forme » qui ont permis l'exploration de champs d'analyse qui autrement seraient restés ignorés. La précisions des arguments, l'ordonnement des débats, la révélation de rétroactions ou d'effets cachés des décisions doivent beaucoup aux modèles.

4-Conclusions : vers un nouveau cycle de la modélisation intégrée ?

Aujourd'hui, avec la mise en place de consortiums de recherche européen, la constitution de grands groupes de recherches multidisciplinaires autour du Changement Climatique, la modélisation intégrée paraît traverser une crise. Les grands modèles de simulation séquentielle restent controversés en raison des difficultés à définir les scénarios qui les gouvernent et celles qui résultent de l'incertitude sur les climats locaux. Les modèles conceptuels et compacts ont permis à beaucoup de raisonnements fondamentaux sur la structure de l'action de se développer, mais leur agrégation extrême ne répond pas suffisamment aux enjeux actuels de la décision et de la négociation. Par ailleurs les modèles restent faibles sur des questions fondamentales comme les stratégies multigaz, la séquestration, l'adaptation, les conséquences macro-économiques des grandes transformations nécessaires pour stabiliser les émissions.

Il est donc nécessaire de faire un bilan pour enclencher un nouveau cycle de recherche sur la modélisation intégrée, qu'il faut souhaiter encore plus coopératif que le cycle qui s'achève. Aujourd'hui deux pistes paraissent s'ouvrir. La première a trait à la demande des climatologues de disposer de scénarios socio-économiques d'émissions fiables pour gouverner les modèles de climat. Les équipes de socio-économistes sont donc à l'œuvre pour tenter de préciser et de réduire l'incertitude sur les scénarios à l'horizon 2050. Inversement on peut se demander si une démarche « semi-intégrée » ne serait pas requise. Par exemple une démarche dans laquelle les climatologues fourniraient des scénarios climatiques de plus en plus précis (avec diverses courbes de stabilisation et séquences climatiques), scénarios qui seraient utilisés par les socio-économistes pour tenter de mettre à jour la variété des configurations d'actions, d'adaptation et de dommages compatibles avec chaque scénario climatique. La tendance paraît ainsi s'orienter vers un découplage provisoire. Chaque communauté se bornant à harmoniser ses scénarios et leurs multiples alternatives aux scénarios qui lui sont fournis par la discipline complémentaire.

Mais cette phase ne fait que préparer la suivante, lorsque la science des systèmes dynamiques de grande complexité aura également progressé en parallèle, une nouvelle phase de couplage des modèles de climat et des modèles socio-économique de niveau mondial pourra s'ouvrir.

Bibliographie: textes cités et articles de références

Alcamo J. ed. (1994) IMAGE 2.0 Integrated Modeling of Global Climate Change. Kluwer Academic Publishers : Dordrecht, Boston, London
Ambrosi, P., Hourcade, J.-C., Hallegatte, S., Lecocq, F., Dumas, P., & M. Ha Duong (2003). "Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages", *Environmental Modeling and Assessment*, in press.
Bruckner T. & al (1999) Climate change decision support and the tolerable window approach. *Environmental Modeling and Assessment*, 4 :217-234
Capros, P., Georgakopoulos, P. , Van Regemorter, D., Proost, S., Schmidt, T.F.N., Koschel, H., Conrad, K., and Vouyoukas, E.L. (1999), *Climate Technologies Strategies 2, The*

Macroeconomic Cost and Benefit of Reducing Greenhouse Gas Emissions in the European Union, ZEW Economic Studies 4 (ZEW, Mannheim)

Dowlatabadi H. (1995) Integrated assessment models of global change. An incomplete overview. *Energy Policy*, vol 23, number 4/5 : 289-296.

Forrester J.W. (1971) *World Dynamics*, Wright-Allen Press, Inc, Cambridge, Mass.

Ha-Duong M., Grubb M. J., Hourcade J.C. (1997) Influence of socio-economic inertia and uncertainty on optimal CO₂ emission abatement. *Nature*, 390 :270-274.

J.C. Hourcade, P. Quirion; Les coûts des politiques climatiques en 2010 et au delà; *Annales des Mines* Janvier 2003

Janssen M. (1998) *Modelling Global Change : The Art of Integrated Assessment Modelling*. Edward Elgar : Cheltenham, Northampton.

Kann A. Weyant J.P. (2000) Approaches for performing uncertainty analysis in large scale energy/economic policy models. *Environment Modeling and Assessment*, 5 :29-46

Manne A., Richels R. (1995) The greenhouse debate : Economic efficiency, burden sharing and hedging strategies. *The Energy Journal*, vol 16, n84 : 1-37

Meadows, Dennis et al. (1972) *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books

Matarasso (P.) (1997).- "Quelques remarques sur l'intégration de modèles climatiques, biophysiques et économiques dans le cadre de recherche sur l'environnement", », pp.197-206.-In « F. Blasco (éd.), *Tendances Nouvelles en modélisation pour l'environnement* , Paris, Elsevier, pp. 197-206

Matarasso (P.) (2001) "Integrated Assessment Models of Global Change", in: *Encyclopedia of Global Environmental Change (EGEC)*. Wiley, vol 5

Nordhaus W.D. (1973) "World Dynamics: Measurement Without Data," *The Economic Journal* , Volume 83, No. 332,

Nordhaus W.D. (1994) *Managing the Global Commons*. The MIT Press : Cambridge MA; London.

Portney P.R. and Weyant J.P. eds. (1999) *Discounting and Intergenerational Equity*.

Ressource For the Future : Washington DC

Rotmans J. (1998) Method for IA : the challenges and opportunities ahead. *Environmental modeling and assessment* 3 :155-180.

Schellnhuber H.-J. Wenzel (1998) *Earth System Analysis, Integrating Science for Sustainability*. Springer-Verlag :Berlin, Heidelberg, New York.

Tol R.S.J. (1996) *A Decision-Analytic Treatise of the Enhanced Greenhouse Effect*, Vrije Universiteit : Amsterdam.

Wigley T.M.L., Richels R. & Edmonds J.A. (1996) Economic and environmental choices in the stabilisation of atmospheric CO₂ concentrations. *Nature*, 379 : 240-243

Biblio-web

Les sites suivants permettent d'obtenir une information détaillée sur les différents modèles cités et dans la plupart des cas de les télécharger, on y trouve également des publications en lignes

<http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/>

Page personnelle de W. Nordhaus (modèle climat et autres travaux

<http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/dicemodels.htm>

Page de William Nordhaus donnant accès à ses modèles "climat" DICE et RICE

<http://www.andrew.cmu.edu/user/mduong/>

Page personnelle de Minh Ha Duong auteur du modèle DIAM

<http://www.uni-hamburg.de/Wiss/FB/15/Sustainability/tol.html>

Page personnelle de Richard Tol auteur du modèle FUND

<http://www.stanford.edu/group/MERGE/>

Site du modèle MERGE de Manne et Richels

<http://www.stanford.edu/group/EMF/home/index.htm>

Site de l'EMF (Energy Modelling Forum de Stanford)

<http://arch.rivm.nl/image/> site du modèle IMAGE
http://www.ecn.nl/unit_bs/etsap/main.html
 Page de l'ETSAP qui fédère les utilisateurs de MARKAL
<http://www.gerad.ca/~amit/emg/>
 Site de l'Energy Modeling Group un des groupes les plus actifs sur MARKAL
<http://www.gams.com>
 Site de GAMS langage de programmation utilisé par Nordhaus, MERGE et MARKAL

Annexe

Le modèle DICE de Nordhaus : un modèle « top down »-« coût-bénéfice » intertemporel

On présente ici, de manière très simplifiée, la structure du modèle DICE sans détailler les formes fonctionnelles. Ce modèle est un modèle exprimé en temps discret dans le cadre du logiciel GAMS. Ce logiciel crée un système d'équations par déclinaisons des équations suivantes pour toutes les périodes traitées et soumet cet ensemble d'équations (où toutes les périodes sont traitées « simultanément ») à un solveur dirigé par un critère d'optimisation. C'est ce principe qui fonde les résolutions intertemporelles. Pour une description détaillée voir : <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/dicemodels.htm>

Equations intra-périodiques

$Y(t) = \Omega(t)A(t)f[N(t), K(t)]$	Définition de la production $Y(t)$ en fonction du stock de capital $K(t)$ et de la main d'œuvre disponible $N(t)$ avec des pondérations $A(t)$ et $\Omega(t)$ dues respectivement au progrès technique, aux dommages et aux efforts de réduction
$Y(t) = C(t) + I(t)$	Equilibre économique, la production $Y(t)$ se partage entre la consommation $C(t)$ et l'investissement $I(t)$
$E(t) = [1 - \mu(t)]\sigma(t)Y(t)$	Définition des émissions $E(t)$ à partir de la production $Y(t)$, des efforts de réductions $\mu(t)$ et de l'intensité en émissions de carbone $\sigma(t)$ de $Y(t)$
$\Omega(t) = l[T(t), \mu(t)]$	Réductions de production dues aux dommages liés à l'augmentation de température $T(t)$ et aux coûts de la réduction des émissions $\mu(t)$

Equations inter-périodiques d'évolutions

$K(t)=(1-\delta)K(t-1)+I(t-1)$ Evolution du capital $K(t)$ en fonction de sa dépréciation et de l'investissement $I(t)$

$M(t)=g[E(t-1),M(t-1)]$ Evolution de la masse de carbone atmosphérique en fonction des émissions et de cette masse à la période précédente

$T(t)=h[T(t-1),M(t-1)]$ Evolution de la température en fonction de la masse de carbone atmosphérique et de l'état de la température à la période précédente (modèle de climat simplifié)

Variables de contrôles

$\mu(t)$ Taux de réduction des émissions dans l'économie

$C(t)$ Consommation des ménages, $c(t)$ consommation par tête

Chroniques exogènes d'évolution du progrès technique et du facteur d'émission

$A(t)$ Progrès technique (exogène)

$\sigma(t)$ Intensité de la production en émissions (exogène)

$N(t)$ Evolution de la population (exogène)

ρ Taux d'escompte social

Critère d'optimisation intertemporel : somme actualisée d'une fonction de la consommation par tête et de la population

$$\max_{\{c(t), \mu(t)\}} \sum_t U[c(t), N(t)] * (1+\rho)^{-t}$$